

# La campagne Cops : genèse et cycle de vie de la convection en région montagneuse

## Résumé

L'étude des précipitations convectives induites par l'orographie (Cops selon l'acronyme anglais) est un projet international coordonné qui comprend une campagne d'observations de terrain et un programme scientifique et qui vise à améliorer la qualité des prévisions des précipitations orographiques convectives à la fois par l'observation quadridimensionnelle et la modélisation de leur cycle de vie. La campagne de terrain s'est déroulée en juin-juillet-août 2007 sur l'est de la France et le sud-ouest de l'Allemagne. Son objectif majeur était de fournir un jeu d'observations météorologiques, *in situ* et à distance, aussi complet que possible et sur toute la profondeur de la colonne troposphérique. Après une brève revue d'ensemble du projet, l'article se concentre sur la contribution française à la campagne Cops, décrit le dispositif expérimental mis en œuvre et met en valeur quelques observations clés.

## Abstract

### The COPS field experiment: initiation and life cycle of convection in mountainous area

The Convective and Orographically-induced Precipitation Study (COPS) is a coordinated international project, comprised of an observational field campaign and a research programme aiming to advance the quality of forecasts of orographically-induced precipitation by four-dimensional observations and modelling of its life cycle. The COPS field campaign took place during June-July-August 2007 over eastern France and south-western Germany. Its main objective was to provide an unprecedented comprehensive set of *in situ* and remotely-sensed meteorological observations of the entire depth of the troposphere. After a short overview of the project, the paper focuses on the French contribution to the COPS field phase, describes the experimental setup and highlights some key observations.

**E. Richard<sup>(1)</sup>, C. Flamant<sup>(2)</sup>, F. Bouttier<sup>(3)</sup>, J. Van Baelen<sup>(4)</sup>,  
C. Champollion<sup>(5)</sup>, S. Argence<sup>(1)</sup>, J. Arnault<sup>(1)</sup>, C. Barthlott<sup>(6)</sup>,  
A. Behrendt<sup>(7)</sup>, P. Bosser<sup>(8)</sup>, P. Brousseau<sup>(3)</sup>, J.-P. Chaboureaud<sup>(1)</sup>,  
U. Corsmeier<sup>(6)</sup>, J. Cuesta<sup>(9)</sup>, P. Di Girolamo<sup>(10)</sup>, M. Hagen<sup>(11)</sup>,  
C. Kottmeier<sup>(6)</sup>, P. Limnaios<sup>(12)</sup>, F. Masson<sup>(13)</sup>, G. Pigeon<sup>(3)</sup>, Y. Pointin<sup>(4)</sup>,  
F. Tridon<sup>(4)</sup>, Y. Seity<sup>(3)</sup> et V. Wulfmeyer<sup>(7)</sup>**

- (1) Laboratoire d'aérodynamique (LA), CNRS et université de Toulouse  
14, avenue Belin - 31400 Toulouse  
evelyne.richard@aero.obs-mip.fr
- (2) Service d'aéronomie (SA), CNRS et université Pierre-et-Marie-Curie
- (3) Centre national de recherches météorologiques (CNRM), Météo-France
- (4) Laboratoire de météorologie physique (Lamp),  
CNRS et université Blaise-Pascal
- (5) Géosciences Montpellier (GM), université de Montpellier 2
- (6) Institut für Meteorologie und Klimaforschung,  
Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Allemagne
- (7) Institut für Physik und Meteorologie, Universität Hohenheim,  
Stuttgart, Allemagne
- (8) Institut géographique national (IGN)
- (9) Laboratoire de météorologie dynamique (LMD),  
CNRS et université Pierre-et-Marie-Curie
- (10) DIFA, Università degli Studi della Basilicata, Potenza, Italie
- (11) Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), Wessling, Allemagne
- (12) Direction interrégionale du Nord-Est (DIRNE), Météo-France
- (13) École et observatoire des sciences de la Terre (Eost),  
CNRS et université de Strasbourg

La prévision quantitative des précipitations (PQP) en régions montagneuses reste encore un grand défi posé à la communauté des sciences atmosphériques. Ces régions sont des zones à risque puisque l'accroissement des précipitations par l'orographie peut y conduire à de fortes et rapides inondations. Toutefois, les différents mécanismes qui conduisent au déclenchement des précipitations en zone de relief et surtout leur importance relative ne sont encore ni bien compris ni bien modélisés. L'analyse des prévisions opérationnelles révèle en effet de bien piètres performances quant à la prévision de l'occurrence des épisodes pluvieux et montre que ces prévisions exhibent encore des défauts systématiques tels qu'une mauvaise distribution amont-aval des quantités de pluie ou encore un déclenchement trop précoce des précipitations convectives.

Plusieurs facteurs sont généralement invoqués pour expliquer ces mauvaises performances :

- une trop grande imprécision des conditions initiales des modèles due à une mauvaise qualité ou un nombre insuffisant d'observations, cela est particulièrement vrai pour le champ d'humidité qui présente une forte variabilité spatiale ;
- une utilisation sous-optimale des observations existantes ou le manque de systèmes d'assimilation capables d'intégrer des observations existantes mais non-standard ;
- des imperfections dans les modèles eux-mêmes telles qu'une trop faible résolution spatiale ou une mauvaise représentation (on parle aussi de paramétrisation) des processus physiques.

Devant ce constat, la communauté scientifique s'est mobilisée autour d'une initiative allemande pour lancer un programme ambitieux visant à progresser significativement en matière de PQP. Un élément clé de ce programme a été la réalisation de la campagne Cops (Convective and Orographically-induced Precipitation Study) qui s'est

principalement intéressée aux précipitations convectives estivales (les moins bien prévues !) et dont les objectifs visaient à :

- établir un jeu de données quadri-dimensionnel de l'ensemble des variables météorologiques troposphériques (aérosols inclus) ;
- développer des méthodes d'assimilation permettant de mieux initialiser les variables du cycle de l'eau dans les modèles qui résolvent la convection ;
- recueillir une documentation complète de la condition de surface et de son évolution spatio-temporelle ;
- élaborer de nouvelles paramétrisations et en évaluer l'impact sur l'amélioration de la PQP.

La campagne Cops s'est déroulée de juin à août 2007 sur le sud-ouest de l'Allemagne et l'est de la France. La zone sélectionnée est représentée figure 1. Elle recouvre un domaine de 250 km x 170 km et comporte trois reliefs remarquables : les Vosges, la Forêt-Noire et le Jura souabe. En été, cette zone est particulièrement propice aux épisodes convectifs qui, selon la climatologie, s'y produisent presque un jour sur deux.

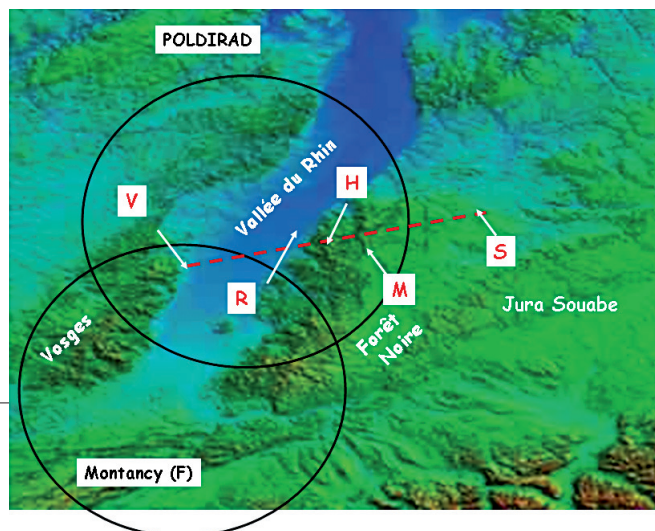
## Vue d'ensemble du dispositif expérimental

Pour répondre aux objectifs de Cops, il était indispensable de disposer d'observations permettant d'appréhender l'intégralité du cycle de vie des systèmes précipitants, depuis les caractéristiques de l'environnement préconvectif jusqu'à la phase mature, voire l'extinction du système précipitant. Un effort important a donc été consenti pour mettre en œuvre un dispositif ambitieux permettant de fournir les observations adéquates à haute résolution spatio-temporelle et sur l'ensemble du domaine. Les mesures ont porté sur une vaste gamme de paramètres : les variables météorologiques classiques (pression, vent, température et humidité), mais également des variables ayant trait aux aérosols et aux hydrométéores, ou encore des variables permettant de caractériser les bilans énergétique et hydrique de la surface.

Le dispositif instrumental déployé (voir figure 1) a reposé sur :

- l'implantation de cinq supersites instrumentés de manière homogène, disposés

Figure 1 - Carte montrant la topographie dans le domaine Cops, ainsi que certains des éléments fixes du dispositif expérimental Cops. Les cercles noirs représentent l'extension de la couverture des radars polarimétriques (le radar opérationnel de Montancy, France, et Poldirad du DLR, Centre aérospatial allemand installé près de Strasbourg). La ligne rouge pointillée représente le transect de supersites : Vosges (V), Rhin (R), Hornsgrinde (H), Murg (M) et Stuttgart (S).



le long d'un transect perpendiculaire au sillon rhénan et permettant ainsi d'analyser les transformations des masses d'air au cours de leur déplacement d'ouest en est dans la région Cops ;

- l'extension de la couverture radar avec l'installation du radar en bande C<sup>(1)</sup> Poldirad du DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) près de Strasbourg, permettant notamment de restituer la nature des hydrométéores ;
- la densification de réseaux méso-échelle opérationnels ou de recherche (stations GPS<sup>(2)</sup>, stations météorologiques et de flux en surface, et stations de mesure de l'humidité des sols) ;
- la mise en œuvre de moyens mobiles (radar Doppler en bande X sur camion, et stations de sondage atmosphérique) ;
- l'échantillonnage systématique de la basse troposphère par un ensemble d'avions de recherche, les petits porteurs étant dédiés à la description de l'état de l'atmosphère à l'échelle des vallées et les plus gros porteurs, comme par exemple le Falcon 20 de Safire<sup>(3)</sup>, étant dédiés à la description de l'état de l'atmosphère à méso-échelle et à grande échelle.

## Nature et objectifs de la contribution française

La communauté française impliquée dans Cops (Cops-FR) a largement contribué au dispositif expérimental international. Elle a assuré, d'une part, l'instrumentation d'un supersite dans les Vosges ; d'autre part la mise en œuvre des opérations aéroportées effectuées à partir du Falcon 20 de Safire et la densification du réseau de stations GPS. Elle s'est par ailleurs associée à l'effort international de prévision du temps à très haute résolution spatiale.

La mise en œuvre du réseau de stations GPS et du Falcon 20 (avec à son bord le lidar embarqué Leandre 2 pour la mesure de la vapeur d'eau troposphérique, Bruneau et al., 2001) visait à mieux caractériser la variabilité de la vapeur d'eau à méso-échelle dans la région du sillon rhénan en condition préconvective et postconvective, alors que l'installation du supersite s'adressait davantage à la caractérisation du cycle de vie des systèmes précipitants dans la région des Vosges du Nord.

Les diverses expertises présentes au sein de la communauté Cops-FR ainsi que la qualité des jeux de données acquises pendant la campagne devraient permettre d'analyser, à partir d'une approche couplée observations-modélisation, quelques-uns des processus clés de l'étude du déclenchement de la convection dans la région des Vosges et de la Forêt-Noire, comme par exemple l'impact de l'humidité des sols, des hétérogénéités de surface et de l'orographie sur l'hétérogénéité des champs thermodynamiques dans la couche limite atmosphérique. Les observations

(1) Les termes bande C, X ou K font référence à la fréquence d'émission du radar. Plus la fréquence est élevée, plus le radar est sensible, mais en contrepartie plus l'atténuation du signal est forte et plus réduite est la portée du radar. Le radar en bande C Poldirad a une portée d'environ 100 km contre 20 km pour le radar en bande X du Lamp.

(2) Global Positioning System. Un réseau de stations GPS permet de restituer une information sur la variabilité horizontale du contenu intégré en vapeur d'eau atmosphérique à l'échelle du réseau (Doerflinger, 2001). Sous certaines conditions, et au travers d'une approche tomographique (voir encadré p. 35), un tel réseau permet également de restituer une information résolue verticalement, c'est-à-dire la distribution de la densité de vapeur d'eau dans l'atmosphère (Champollion et al., 2005).

(3) Service des avions français instrumentés pour la recherche en environnement, <http://www.safire.fr>.

de vapeur d'eau troposphérique seront en outre d'un intérêt majeur pour la validation des modèles à haute résolution et la mise au point de méthodes d'assimilation à l'échelle convective.

Un autre objectif, propre à la communauté Cops-FR, est de contribuer à la qualification des produits opérationnels vapeur d'eau de l'instrument spatial Iasi<sup>(1)</sup>, en s'appuyant sur les nombreuses mesures de rapport de mélange de vapeur d'eau ou de contenu intégré en vapeur d'eau acquises sur le domaine Cops dans le cadre des trois mois de la campagne.

## Le supersite des Vosges

Les objectifs de la communauté Cops-FR ont conduit au déploiement d'un supersite à l'est des Vosges et à l'ouest du Rhin (figure 1). Ce site a été instrumenté de manière à respecter une certaine homogénéité avec les autres supersites plus à l'est. Chacun des supersites était équipé d'au moins une station de radio-sondage, d'une station GPS, d'une station météorologique (variables

moyennes et turbulentes) et d'une station de mesure de l'humidité des sols. Ce dispositif était complété par un ensemble de capteurs *in situ* et d'instruments de télédétection actifs (radars, lidars) et passifs (radiomètres). La combinaison de cette instrumentation (à géométrie légèrement variable suivant les sites) a été définie de manière à permettre l'observation du cycle de vie des systèmes précipitants – depuis l'environnement préconvectif (à l'aide des lidars, notamment) jusqu'à l'apparition des précipitations (à l'aide des radars) – sans négliger le besoin en caractérisa-

tion de l'aérosol et des propriétés microphysiques des nuages et des hydrométéores.

L'instrumentation du supersite des Vosges (supersite V) a été répartie en deux sites principaux : le site de Meistratzheim (dans la vallée) où était réunie la majorité des instruments et le

(1) *Infrared Atmospheric Sounding Interferometer* : instrument embarqué sur la plateforme MetOp, satellite météorologique européen en orbite polaire lancé en 2006.

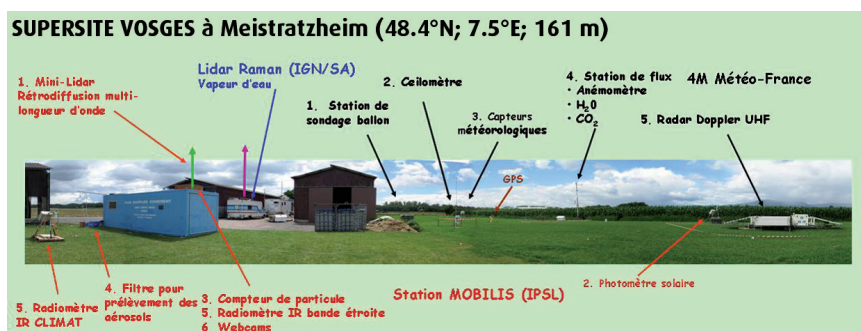


Figure 2 - Vue d'ensemble du dispositif expérimental sur le supersite V (à Meistratzheim, lieu-dit le Niedernott) dans la vallée du Rhin. Les instruments déployés par l'équipe 4M de Météo-France sont listés en noir, et ceux déployés dans le cadre de l'implémentation de la station Mobilis de l'IPSL sont listés en rouge. Les flèches verte et violette matérialisent les lignes de visée du minilidar (opérant dans le visible) et du lidar Raman (opérant dans le proche UV), respectivement.

Tableau 1 - Instrumentation sur le supersite V.

Instrument	Fonctionnement	Mode de visée	Période d'opération	Emplacement
Lidar Raman de l'IGN-SA	Sur POI	Vertical ou incliné	1 <sup>er</sup> juillet - 31 juillet	Meistratzheim
Radar bande X du Lamp	Continu	Balayage	15 juin - 31 août	Bischenberg
Radar bande K du Lamp	Continu	Vertical	15 juin - 31 août	Niedernai (E-N-E Meistratzheim)
Lidar aérosol Station Mobilis de l'IPSL	Sur POI	Vertical	1 <sup>er</sup> juillet - 1-2 août	Meistratzheim
Radiomètres IR Station Mobilis de l'IPSL	Sur POI	Vertical	1 <sup>er</sup> juillet - 1-2 août	Meistratzheim
Filtres aérosol Station Mobilis de l'IPSL	Sur POI	-	1 <sup>er</sup> juillet - 2 août	Meistratzheim
Photomètre solaire Station Mobilis de l'IPSL	Continu	Vertical	1 <sup>er</sup> juillet - 2 août	Meistratzheim
Compteur particules Station Mobilis de l'IPSL	Continu	-	1 <sup>er</sup> juillet - 2 août	Meistratzheim
Profilleur UHF de Météo-France	Continu	Vertical	1 <sup>er</sup> -31 juillet	Meistratzheim
Sodar de Météo-France				Meistratzheim
Station de sondage de Météo-France	Sur POI	Vertical	1 <sup>er</sup> -31 juillet	Meistratzheim
Station d'humidité des sols de Météo-France (2)	Continu	-	1 <sup>er</sup> -31 juillet	→ Meistratzheim → mi-chemin entre l'émetteur et le récepteur du scintillomètre
Stations de flux de Météo-France (2)	Continu	-	1 <sup>er</sup> -31 juillet	→ Meistratzheim → mi-chemin entre l'émetteur et le récepteur du scintillomètre
Scintillomètre de Météo-France	Continu	-	1 <sup>er</sup> -31 juillet	4 km au nord de Meistratzheim
Stations GPS (2)	Continu	Incliné	1 <sup>er</sup> juin - 31 août	→ Bischenberg → Niedernai (E-N-E Meistratzheim)



site du Bischenberg (dans la montagne) où se trouvait le radar en bande X du Laboratoire de météorologie physique [Lamp] et une station GPS. Les instruments présents sur le site principal de Meistratzheim (figure 2) ont été mis en œuvre dans le cadre de l'opération de la station Mobilis de l'Institut Pierre-Simon-Laplace [IPSL] (Cuesta et al., 2008), du camion lidar de l'Institut géographique national-Service d'aéronomie [IGN-SA] et des moyens mobiles de Météo-France [4M]. Le Micro Rain Radar (MRR) en bande K du Lamp, ainsi qu'un scintillomètre appartenant à 4M ont également été mis en œuvre à l'écart du site principal. L'ensemble des instruments déployés pendant la campagne est détaillé dans le tableau 1. Les principes de fonctionnement des instruments de télédétection mis en œuvre sur le supersite V sont décrits dans Dabas et Flamant (2002, lidars, radiométrie), dans Doerflinger (2001, GPS), dans Mauprivez et Sandra (2002, profileurs de vent) et dans Van Baelen et al. (2008, radars précipitation).

## Le réseau GPS

Une autre contribution de Cops-FR a consisté à renforcer le réseau de stations GPS dans la région Cops, et particulièrement sur le territoire français, de manière à optimiser l'échantillonnage de la vapeur d'eau à des fins de tomographie à mésoéchelle (voir l'encadré « La restitution de la vapeur d'eau par tomographie GPS »). Il s'agit d'une contribution innovante, dans la mesure où les études précédentes utilisaient la tomographie à partir d'un réseau très dense de stations GPS sur des domaines très restreints. La faisabilité de la tomographie à mésoéchelle ainsi que l'intérêt d'une telle méthode pour l'étude de l'initiation de la convection ont récemment été mis en évidence dans le cadre du projet IHOP 2002 (International H<sub>2</sub>O Project, Champollion et al., 2009).

Figure 4 - Carte montrant l'ensemble des stations GPS participant à l'expérience Cops : les cercles rouges indiquent des stations GPS du parc Insu (<https://gpscope.dt.insu.cnrs.fr>), installées spécifiquement pour la campagne Cops ; les cercles blancs les stations permanentes allemandes du GFZ (German Research Centre for Geosciences) et du réseau Sapos ([www.sapos.de](http://www.sapos.de)) ; les cercles jaunes les stations permanentes du réseau SwissTopo ([www.swisstopo.ch](http://www.swisstopo.ch)) ; les cercles bleus les stations des réseaux permanents RGP (Réseau géodésique français, [rgp.ign.fr](http://rgp.ign.fr)), Orpheon (partenaire privé) et de l'Inra Nancy ([efdp.nancy-engref.inra.fr](http://efdp.nancy-engref.inra.fr)) et enfin les cercles verts les stations du réseau de l'Eost ([eost.u-strasbg.fr](http://eost.u-strasbg.fr)). Les cercles pleins indiquent les stations équipées d'un système de transmission des données en temps réel. Le quadrillage blanc montre la résolution horizontale de la tomographie GPS dont on notera l'accroissement au niveau du transect est-ouest passant par les supersites.

## La restitution de la vapeur d'eau par tomographie GPS

La tomographie est une méthode mathématique consistant à restituer un champ de vapeur d'eau en trois dimensions (longitude, latitude, altitude) à partir de données de vapeur d'eau en deux dimensions (c'est-à-dire intégrées sur la verticale comme le Contenu intégré en vapeur d'eau, Cive, ou Integrated Water Vapour, IWV en anglais). La tomographie GPS utilise la vapeur d'eau intégrée mesurée en oblique en direction des satellites GPS (SIWV : Slant Integrated Water Vapour). Pour chaque station GPS au sol, on peut en effet calculer la quantité de vapeur d'eau intégrée oblique en direction de tous les satellites visibles à un instant  $t$  (en général une dizaine). Si l'on dispose d'un réseau suffisamment dense de GPS au sol (tous les 50 km ou moins), il est alors possible de restituer le champ de vapeur d'eau en trois dimensions en utilisant l'information redondante aux intersections des SIWV (figure 3). Aujourd'hui, la tomographie GPS est systématiquement réalisée en combinant les mesures GPS à des mesures résolues verticalement (comme les radiosondages).

La tomographie permet ainsi de tirer parti des avantages de chaque instrument de mesure tout en s'affranchissant de ses limitations. Les radiosondages apportent une résolution verticale importante, mais leur nombre est limité dans le temps et dans l'espace. Le GPS apporte à l'inverse une résolution temporelle et spatiale importante, mais sans véritable résolution verticale. Au final, pendant la campagne Cops, la tomographie GPS fournit, par exemple, toutes les heures une coupe est-ouest le long des supersites avec une résolution spatiale de 10 km et verticale de 500 m. Les premières comparaisons avec les mesures Lidar aéroportées montrent des résultats prometteurs.

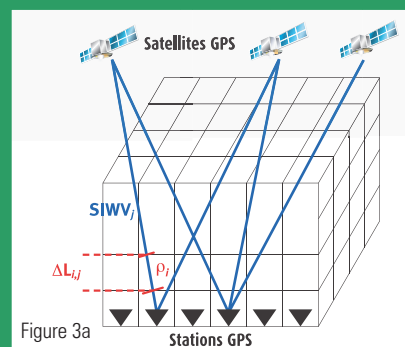


Figure 3a

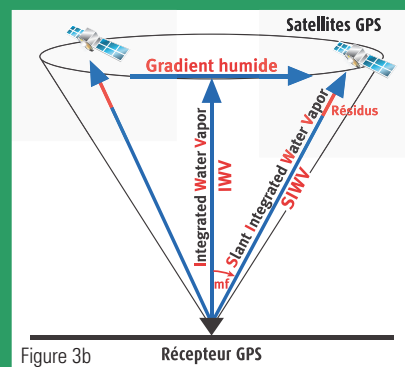
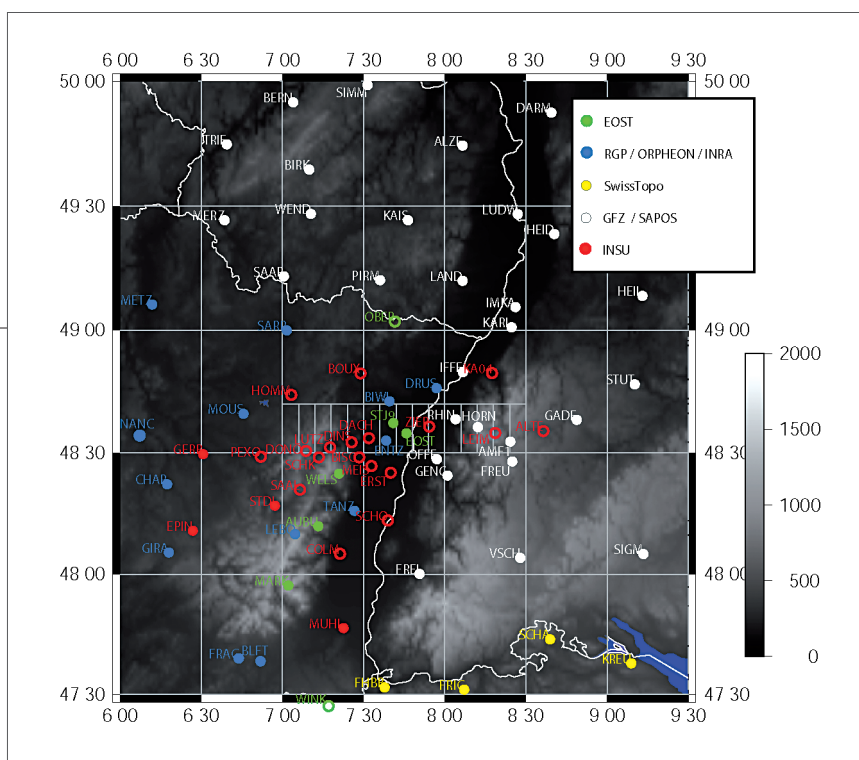


Figure 3b



Ainsi, vingt-cinq stations additionnelles ont été installées (vingt en France et cinq en Allemagne) et sont venues compléter les cinquante-cinq stations permanentes françaises et allemandes existant dans le domaine Cops. Ce réseau densifié (figure 4) permettra de restituer des profils de rapport de mélange de vapeur d'eau avec une résolution horizontale d'environ 50 km et une résolution verticale de l'ordre de 500 m en continu (résolution de 60 min.) sur les trois mois de la campagne. La densité des stations GPS a par ailleurs été davantage accrue le long de l'axe est-ouest passant par les supersites de manière à pouvoir restituer sur ce transect des profils tous les 10 km environ. De manière plus classique le réseau ainsi redéfini a également permis un suivi en temps réel des fluctuations de contenu intégré de vapeur d'eau à travers le domaine Cops pendant les trois mois de la campagne.

## Les opérations aéroportées

La mise en œuvre du lidar à absorption différentielle Leandre 2 à bord du *Falcon 20* avait pour objectif premier la mesure à haute résolution spatiale de la vapeur d'eau dans la basse troposphère, afin d'analyser les relations existant entre la variabilité du champ de vapeur d'eau à mésoéchelle et l'initiation de la convection, à l'instar des études menées autour des « drylines » dans les Grandes Plaines des États-Unis dans le cadre du projet IHOP 2002 (Flamant et al., 2003). La stratégie expérimentale associée a consisté à échantillonner systématiquement le champ de vapeur d'eau dans la région du sillon rhénan en période pré-convective, le long d'axes prédéfinis (figure 5).

Un deuxième objectif dévolu à l'instrument Leandre 2 était de constituer une base de données de référence pour l'intercomparaison des mesures de vapeur d'eau (résolues verticalement), effectuées par les instruments de télédétection (indépendamment de la technique utilisée) au cours de la campagne. Avant de combiner l'ensemble des observations de vapeur d'eau obtenues par différentes techniques (télédétection active et passive, mesure *in situ*), un tel exercice était indispensable.

Figure 5 - Plan de vol typique du *Falcon 20* au cours de missions Cops pendant lesquelles les différents axes est-ouest puis nord-sud (lignes vertes) sont décrits séquentiellement. Les losanges rouges représentent la position des cinq supersites ainsi que la position du radar Poldirad. Les astérisques indiquent les positions de largage de dropsondes. Le triangle violet indique la position de la station de sondage de Burnhaupt (France).

La stratégie expérimentale associée a consisté à effectuer des vols coordonnés avec le *Falcon 20* du DLR (également équipé d'un système lidar vapeur d'eau à absorption différentielle) et survoler systématiquement les sites équipés d'instruments mesurant la vapeur d'eau (c'est-à-dire les supersites V, R, H et M ; cf. figure 1).

Onze vols dédiés à la documentation du champ de vapeur d'eau en période pré-convective et trois vols dédiés à l'intercomparaison ont été réalisés avec le *Falcon 20* du Safire, entre le 9 juillet et le 2 août 2007. Outre la restitution de profils verticaux de rapport de mélange de vapeur d'eau (avec des résolutions verticale et horizontale de l'ordre de 300 m et 4 km, respectivement), Leandre 2 a également permis de cartographier avec précision les couches diffusantes dans l'atmosphère (aérosols et nuages) via la mesure des profils de réflectivité atmosphérique (à 730 nm) à haute résolution (15 m sur la verticale, 200 m sur l'horizontale).

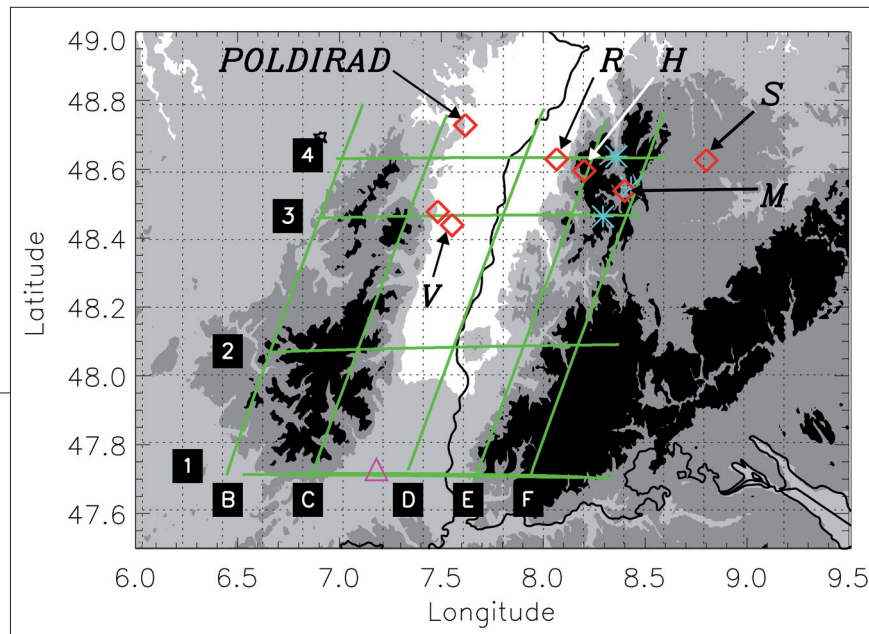
## Modélisation et prévision

Grâce à la coordination avec le projet MAP D-Phase (voir l'encadré « MAP D-Phase »), l'expérience Cops a bénéficié d'un soutien sans précédent en matière de prévision et de modélisation. Pour la conduite de l'expérience, les scientifiques ont disposé d'un ensemble d'une dizaine de prévisions déterministes à l'échelle kilométrique et d'une hiérarchie de différentes prévisions probabilistes allant de l'échelle globale à l'échelle régionale. La communauté française s'est associée à l'effort international en mettant en œuvre deux chaî-

## MAP D-Phase

Le projet MAP D-Phase (Demonstration of Probabilistic Hydrological and Atmospheric Simulation of Flood Events in the Alpine Region ; Rotach et al., 2008) est un « Forecast Demonstration Project » du World Weather Research Programme de l'Organisation météorologique mondiale. Il intervient dans le prolongement de l'expérience MAP (Mesoscale Alpine Programme) dédiée à l'étude des précipitations intenses dans la zone alpine (Bougeault et al., 2001). Lors de MAP (1999), différents modèles météorologiques, de recherche pour la plupart, non-hydrostatiques et de résolution kilométrique, ont été mis au point, testés et évalués. Avec le temps, ces nouvelles techniques de modélisation ont essaimé vers les services météorologiques. MAP D-Phase a pour but d'évaluer en vraie grandeur ces nouveaux outils dans une utilisation quasi opérationnelle. Pour optimiser la valorisation des résultats, la zone et la période d'étude ont été étendues pour couvrir à la fois les intérêts de MAP (Italie du Nord, précipitations intenses automnales) et de Cops (Vosges-Forêt-Noire, précipitations convectives estivales). Plus de trente modèles atmosphériques (couplés à sept modèles hydrologiques) ont participé à MAP D-Phase et mis en ligne leurs résultats de juin à novembre 2007.

nes de prévisions à très haute résolution spatiale, l'une fondée sur une version préliminaire du modèle Arome (le futur modèle opérationnel de Météo-France ; Bouttier, 2007), l'autre exploitant le modèle de recherche Mésoscale-NH développé conjointement par le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et Météo-France (Lafore et al.,



1998). Ces deux modèles partagent globalement le même jeu de paramétrisations physiques, mais diffèrent dans leur système d'équations et leurs schémas numériques ; dans le contexte de Cops, ils ont par ailleurs utilisé des modes d'initialisation et de couplage différents. Les conditions initiales (provenant d'une analyse à 00 h 00 TU) et les conditions aux limites latérales (obtenues à partir de prévisions d'un modèle de plus grande échelle) ont été fournies par le modèle du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMET) dans le cas de Mésos-NH et par le modèle Aladin dans le cas d'Arome. Ces deux chaînes parallèles devraient nous aider à terme à mieux discriminer les erreurs de prévisions émanant du modèle de celles induites par les conditions initiales.

au-dessus du sol). L'accord entre mesures lidar sol et lidar aéroporté est moins bon concernant les comparaisons effectuées de jour (figure 6c) avec un biais compris entre -1 et 1 g.kg<sup>-1</sup>. Les différences peuvent être en partie imputées à une moins bonne performance des systèmes de type Raman en période diurne, et une dégradation du rapport signal sur bruit en fonction de l'altitude (exemple au-dessus de 3 000 m).

Ces résultats sont importants : à l'avenir, les mesures des lidars aéroportés (de loin les plus riches en termes de couverture spatiale) pourront être exploitées avec confiance et Leandre 2 pourra servir de référence pour l'exercice d'intercomparaison impliquant l'ensemble des mesures lidar vapeur d'eau. Les résultats préliminaires de l'intercomparaison entre Leandre 2 et Basil effectuée sur un

échantillon de vingt-cinq coïncidences mettent en évidence un biais moyen de l'ordre de 4 % (0,08 g.kg<sup>-1</sup>) et une erreur quadratique moyenne de l'ordre de 14 % (1 g.kg<sup>-1</sup>) entre 0 et 4,5 km.

## La structure complexe des champs d'humidité

Le 1<sup>er</sup> août, l'advection de masses d'air d'origine saharienne à l'avant d'une perturbation de moyenne latitude a contribué à augmenter la variabilité de la vapeur d'eau avant le déclenchement de la convection sur les Vosges et la Forêt-Noire suite à l'arrivée d'un front chaud sur la région Cops. Les figures 7 et 8 illustrent la complémentarité entre les mesures lidar de vapeur et de rétrodiffusion atmosphérique acquises sur le supersite V et celles effectuées à bord

## Les premiers résultats

### Un prérequis : la validation croisée des mesures de vapeur d'eau

Les premières comparaisons systématiques entre Leandre 2 et les dropsondes (figures 6a et 6b), d'une part, et entre Leandre 2 et le lidar sol Raman Basil de l'université de la Basilicata (supersite R, figures 6c et 6d), d'autre part, ont révélé les très bonnes performances de Leandre 2 au cours de la campagne. Les différences observées entre les mesures Leandre 2 et dropsondes sont essentiellement liées à la géométrie d'observation associée à chacune des techniques. Le profil Leandre 2 est issu d'un sondage vertical, quasi instantané de l'atmosphère dans la région de largage de la dropsonde, alors que le profil issu de celle-ci est obtenu en une quinzaine de minutes le long d'une trajectoire oblique fortement influencée par les vents de basses couches. A contrario, l'accord entre les profils obtenus de nuit (figure 6d) par lidar Raman et à absorption différentielle est excellent (biais quasi nul entre 1 000 et 4 500 m

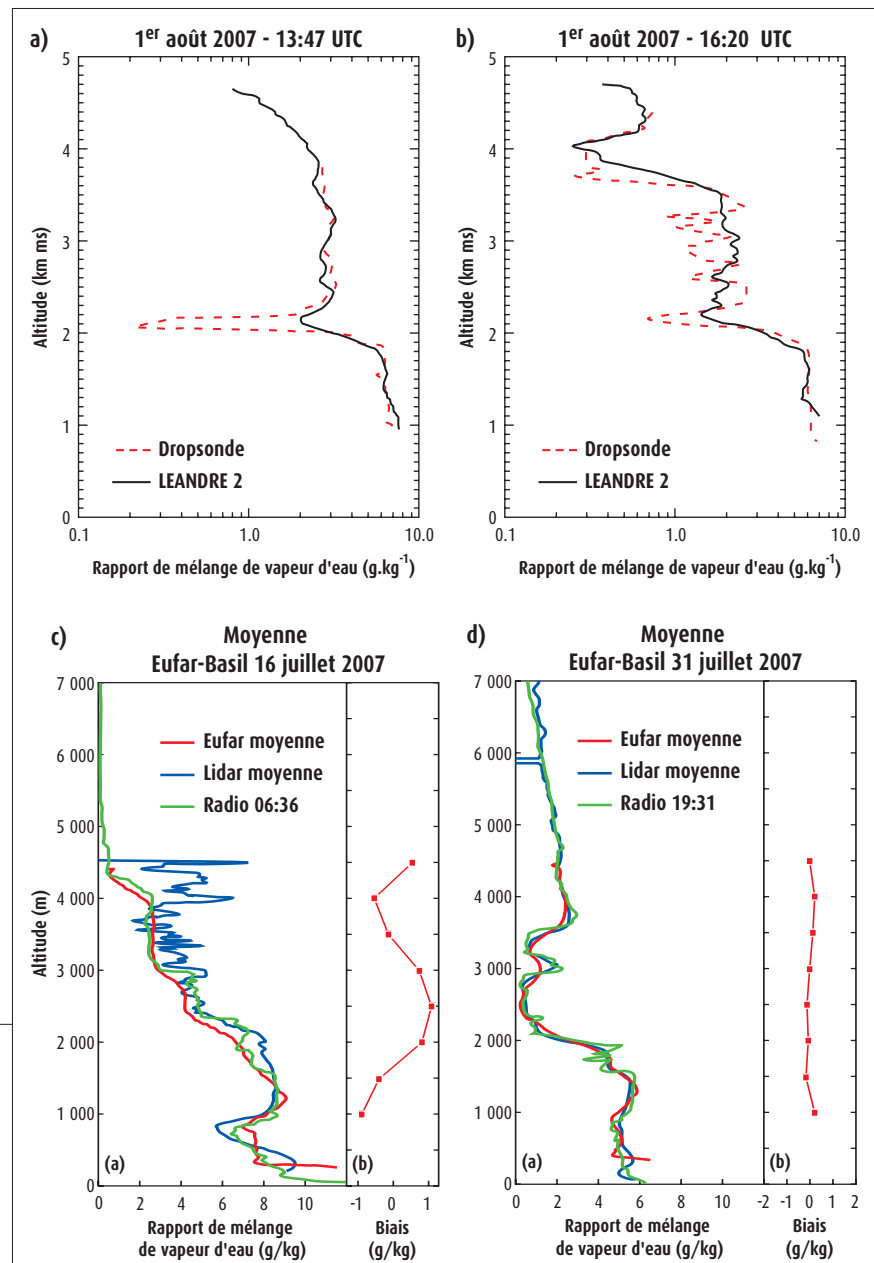


Figure 6 - Comparaison entre profils de rapport de mélange de vapeur d'eau issus de mesures dropsondes et du système aéroporté Leandre 2, le 1<sup>er</sup> août à 13 h 47 TU (a) et 16 h 20 TU (b). Comparaison entre profils de rapport de mélange de vapeur d'eau issus de mesures du système aéroporté Leandre 2 (rouge), du système sol Basil opéré sur le supersite R (bleu) et de radiosondage (vert) pour (c) le 16 juillet (mesures de jour) et (d) le 31 juillet (mesures de nuit).



Figure 7 -  
a) Réflectivité atmosphérique à 532 nm observée par le lidar rétrodiffusion de la station Mobilis entre 18 h 00 TU le 31 juillet et 03 h 00 TU le 2 août 2007 sur le supersite V.  
b) Rapport de mélange de vapeur d'eau atmosphérique observé par le lidar Raman entre 18 h 00 TU le 31 juillet et 03 h 00 TU le 1<sup>er</sup> août.

du *Falcon 20* au cours de la journée du 1<sup>er</sup> août et de la nuit précédente.

La figure 7a montre la réflectivité atmosphérique (à 532 nm) issue du lidar rétrodiffusion de la station Mobilis entre 18 h 00 TU le 31 juillet et 03 h 00 TU le 2 août 2007. Les données du lidar ont ainsi permis de documenter :

- les processus dynamiques de couche limite en phase préconvective (jusqu'à environ 15 h 00 TU le 1<sup>er</sup> août) ;
- puis l'arrivée des masses d'air d'origine saharienne, mise en évidence notamment par l'augmentation de la réflectivité dans la troposphère libre (entre 2 et 5 km d'altitude) associées à la présence des aérosols désertiques (entre 15 h 00 TU le 1<sup>er</sup> août et 01 h 00 TU le 2 août) ;
- et enfin, l'arrivée du front chaud, identifiable par les fortes valeurs de réflectivité associées aux nuages de type cirriforme, entre 7 et 8 km, vers 00 h 30 TU le 2 août dans un premier temps, puis par la baisse systématique de la base des nuages présents le long du front (de type alto-cumulus, puis altostratus et enfin nimbostratus) jusqu'à l'apparition de la pluie sur le site vers 02 h 00 TU le 2 août.

Les données du lidar Raman (figure 7b) montrent la complexité de la structure verticale du champ de vapeur d'eau au cours de la nuit du 31 juillet au 1<sup>er</sup> août, et notamment la présence d'une couche très sèche (entre 2 et 3 km) et caractérisée par un rapport de mélange de l'ordre de 1 à

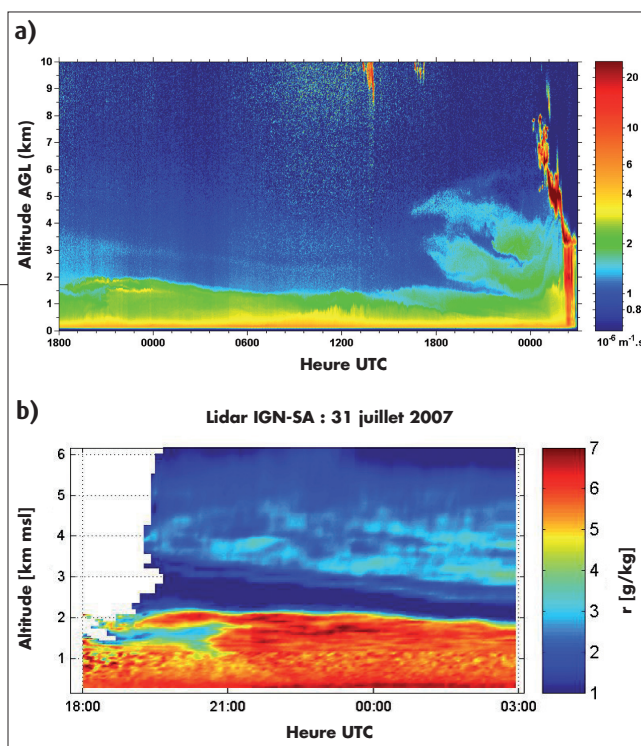
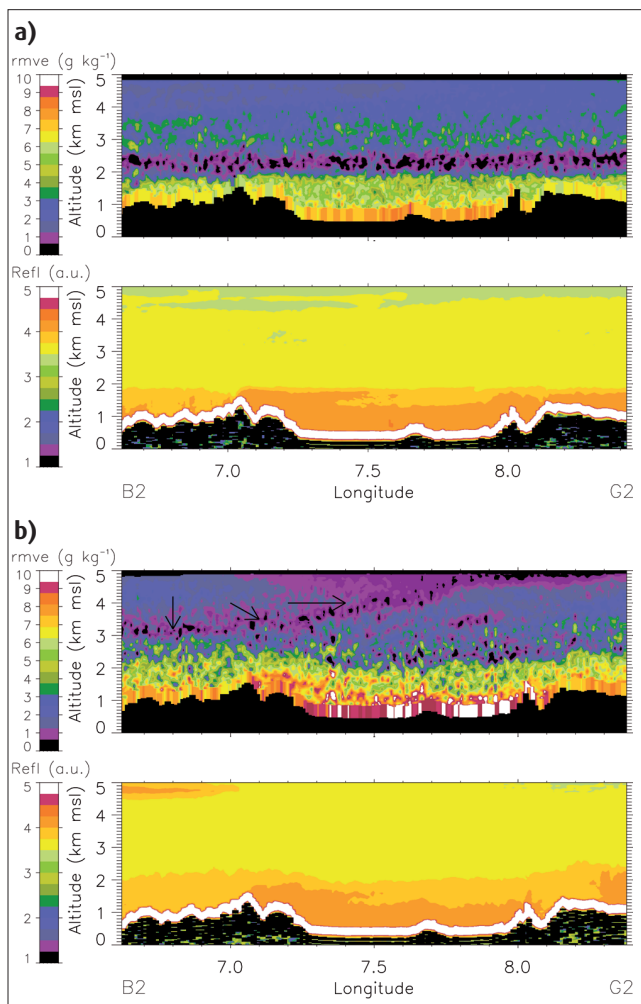


Figure 8 - a) Observations Leandre 2 le long de l'axe est-ouest numéroté 2 sur la figure 5 entre 08 h 41 et 08 h 55 TU le 1<sup>er</sup> août 2007.

b) Même chose que pour (a), mais entre 14 h 20 et 14 h 35 TU. En (a) et (b), sont montrées les coupes de rapport de mélange de vapeur d'eau (haut, en g/kg) et de réflectivité atmosphérique à 730 nm (bas, en unité arbitraire). L'orographie apparaît en noir.



2 g.kg<sup>-1</sup>, surmontant une couche plus humide (5 à 7 g.kg<sup>-1</sup>), correspondant à une couche résiduelle, c'est-à-dire les reliquats de la couche limite convective s'étant développée la veille. Au-dessus de la couche sèche, on note la présence d'une couche légèrement plus humide (3 à 4 g.kg<sup>-1</sup>).

La figure 8a montre les observations du champ de vapeur d'eau à mésoéchelle, acquises par le lidar Leandre 2 à bord du *Falcon 20* entre 08 h 40 et 08 h 55 TU le 1<sup>er</sup> août, le long d'un axe orienté est-ouest et au sud du supersite V. Ces données mettent en évidence les trois mêmes couches que celles observées avec le lidar Raman la nuit précédente, ainsi que leur extension horizontale au travers du sillon rhénan et au-dessus du relief. Les observations, effectuées par Leandre 2 en début d'après-midi (14 h 20 - 14 h 35 TU, figure 8b) sur le même axe, montrent une situation assez différente avec la quasi-disparition de la couche sèche au sommet de la couche limite, et l'apparition d'une couche très sèche à l'interface entre la masse d'air d'origine saharienne (à l'ouest du domaine, indiquée par les trois flèches sur la figure 8b) et la masse d'air à l'avant de celle-ci. Les prémices du panache de poussières désertiques observées en fin d'après midi le 1<sup>er</sup> août au-dessus de la vallée du Rhin sont également visibles sur les données de réflectivité Leandre 2 à l'ouest de 7° E et vers 5 km d'altitude.

L'ensemble des données recueillies par les différentes plates-formes au cours de cette période devrait notamment permettre de mieux comprendre le rôle des advections humides de secteur sud-ouest à l'avant des perturbations de moyenne latitude sur le déclenchement de la convection dans la région des Vosges et de la Forêt-Noire.

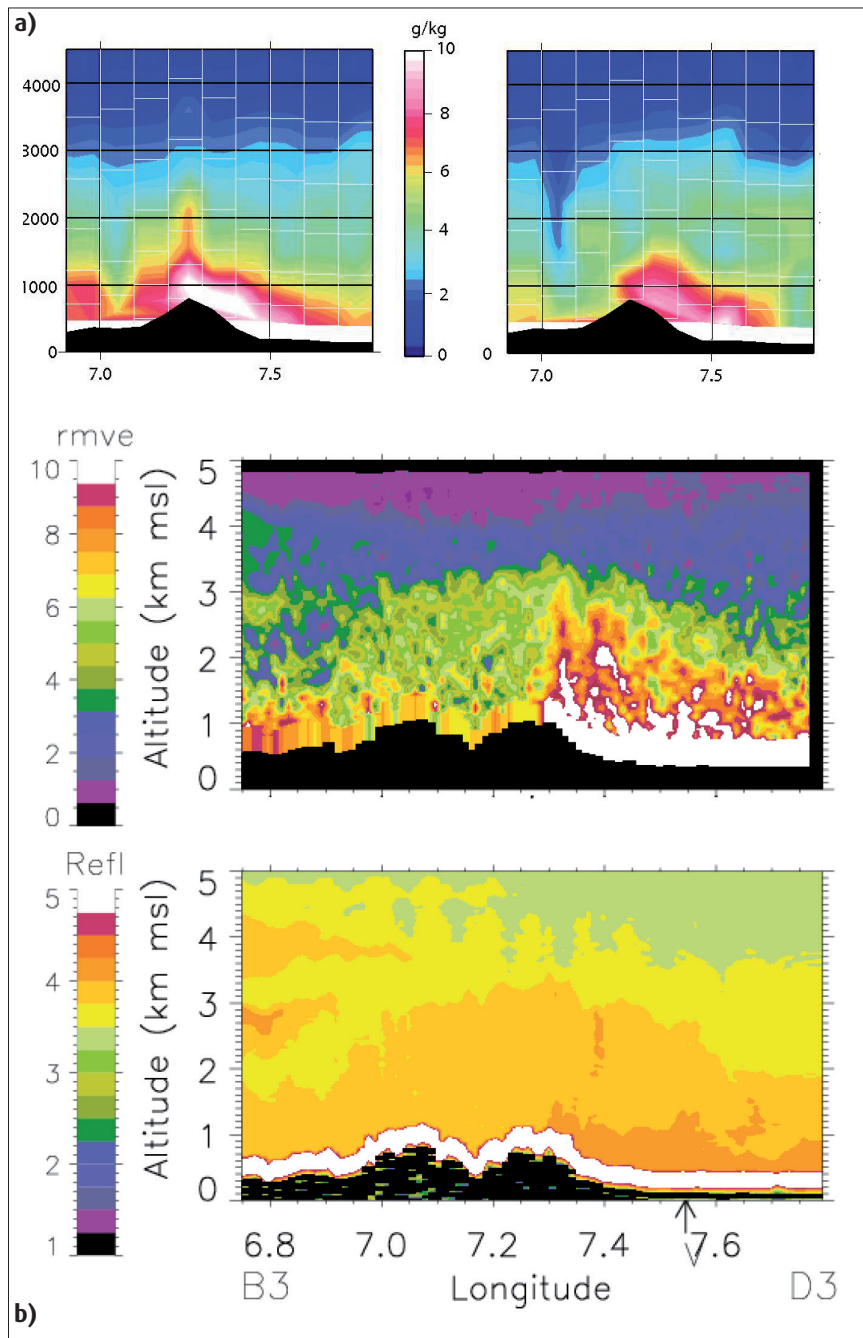


Figure 9 -  
a) Densité de vapeur d'eau (coupe longitude-altitude) issue de l'analyse tomographique le long de l'axe est-ouest B3-D3 (voir figure 5 pour la localisation), le 15 juillet entre 12 h 00 et 12 h 30 TU (gauche) et entre 13 h 00 et 13 h 30 TU (droite).  
b) Idem à la figure 8a, mais le 15 juillet le long de l'axe B3-D3, entre 13 h 16 et 13 h 26 TU.

ouest des courants anabatiques qui se développent sur les flancs du relief sous l'influence du réchauffement diurne ? L'utilisation conjointe de la tomographie et des jeux de données plus résolus, mais aussi plus ponctuels, permettront de mieux comprendre l'influence du système convectif sur son environnement, et plus particulièrement sur la variabilité du champ de vapeur d'eau dans la région Cops.

### La prévision d'un orage isolé : une question de chance ?

Les orages isolés sont particulièrement difficiles à prévoir et mettent très souvent en échec les modèles opérationnels actuels. Trois conditions sont nécessaires à leur déclenchement : une humidité suffisante dans les basses couches de l'atmosphère, une instabilité potentielle de la masse d'air et un mouvement vertical ascendant résultant, soit du réchauffement diurne du sol, soit du soulèvement orographique. Si les mécanismes déclencheurs sont connus, il est rare que leur représentation dans les modèles soit suffisamment précise pour permettre de répondre avec exactitude aux questions suivantes : où, quand, combien et pendant combien de temps va-t-il pleuvoir ? Les résultats obtenus sur le cas du 15 juillet montrent cependant des résultats encourageants pour les modèles de haute résolution. Mésa-NH de résolution horizontale 2 km (de même qu'Arome de résolution 2,5 km) a été capable de prévoir l'orage fugace, mais violent, qui s'est formé en fin d'après-midi à proximité de Freudens-tadt en Forêt-Noire (figure 10). Ce sont les deux seuls modèles de l'ensemble D-Phase qui sont parvenus à ce résultat. Il est dès lors essentiel d'identifier et d'analyser les causes du succès ou de l'échec de ces différentes prévisions. Sont-elles imputables à la nature chaotique de l'atmosphère, auquel cas les bonnes prévisions l'ont été par chance ou bien existe-t-il un facteur déterministe qui a conditionné le succès des bonnes prévisions ?

### Les mesures d'humidité par GPS

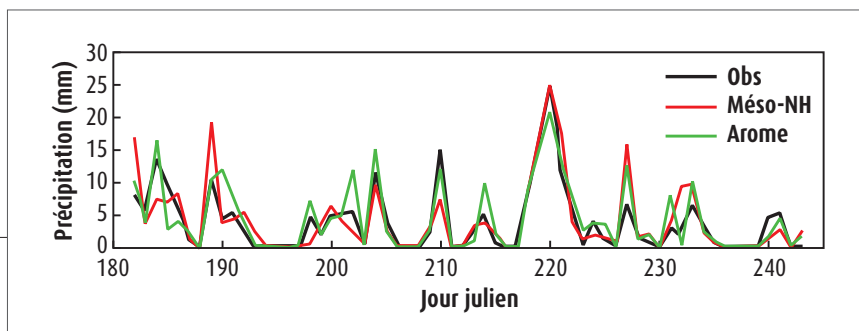
La figure 9a présente une coupe verticale (longitude-altitude) de densité de vapeur d'eau le long d'un axe est-ouest extraite de l'analyse tomographique de la journée du 15 juillet 2007 à deux échéances au cours de l'après-midi, période durant laquelle une cellule orageuse isolée s'est développée au-dessus de la Forêt-Noire (cf. paragraphe suivant). Les observations GPS mettent en évidence une accumulation d'humidité sur le flanc est des Vosges et au-dessus de la vallée du Rhin. Elles mettent également en exergue la grande variabilité temporelle du champ de vapeur d'eau dans cette

région. La distribution verticale de la vapeur d'eau au-dessus des Vosges suggère l'existence d'une circulation anabatique associée au chauffage le long des pentes de la montagne. Ces observations sont corroborées par les mesures de rapport de mélange de vapeur d'eau acquises avec Leandre sur le même axe, et qui montrent aussi une accumulation d'humidité à l'est des Vosges (figure 9b). Ce comportement a été observé le long de la vallée du Rhin sur une centaine de kilomètres. Les raisons de cette accumulation de vapeur d'eau sont encore mal connues : est-elle liée à une intensification des échanges surface-atmosphère dans la vallée ? Ou bien résulte-t-elle d'une dissymétrie est-





Figure 13 - Évolution temporelle pour juillet et août 2007 de la moyenne spatiale des précipitations journalières observées et prévues. Les précipitations prévues ont été interpolées aux points de mesure et le domaine spatial considéré correspond à celui de la figure 9.



culminant du massif vosgien juste à l'ouest du radar et avant la plaine du Rhin. Jusqu'à 13 h 08 TU, la cellule grossit sur place, alimentée par les processus convectifs. Plus tard, elle est entraînée par le vent moyen de sud-ouest, alors qu'une seconde cellule est générée légèrement plus en amont.

La combinaison de ces jeux de données très complémentaires est d'un intérêt crucial pour la validation des modèles numériques. Elle permet à la fois d'étudier très en détail la phase d'initiation de la convection, d'en suivre le déplacement spatial et d'appréhender son cycle de vie.

## L'évaluation des modèles

L'évaluation des modèles de haute résolution et capables de résoudre explicitement la convection fait partie des enjeux majeurs de Cops. Cette évaluation sera conduite in extenso dans le cadre du projet MAP D-Phase. La figure 13 permet d'obtenir un aperçu de résultats. Elle montre l'évolution

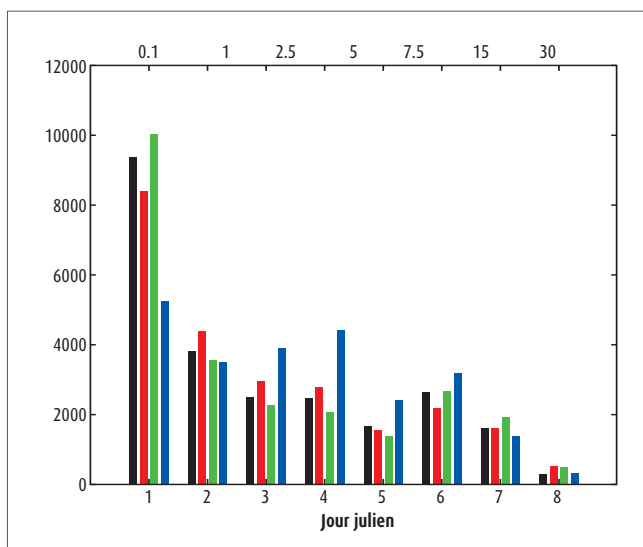
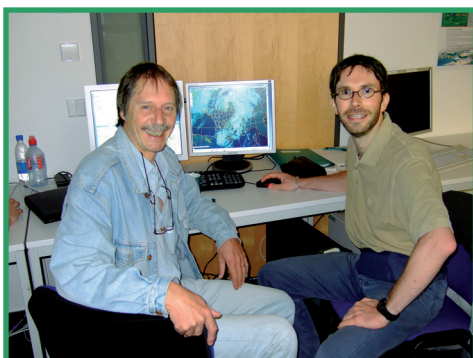


Figure 14 - Distribution de l'intensité des précipitations journalières observées (en noir) et prévues (en rouge : Mésos-NH ; en vert : Arome ; en bleu : Aladin). Les prévisions ont été interpolées aux points de mesure. Les valeurs séparant les différentes classes de précipitations sont indiquées (en mm) en haut du graphique.

temporelle des précipitations journalières, moyennées sur la région Cops, mesurées et prévues par les modèles Arome et Mésos-NH au cours de juillet et août 2007. On y constate que les pics de précipitation sont bien reproduits par les deux modèles ; cela est vrai pour leurs occurrences, mais un peu moins sur leur intensité. Il est particulièrement intéressant de constater que ces deux modèles, qui partagent les mêmes paramétrisations physiques, sont parfois en désaccord, ce qui met

en évidence le très fort impact des conditions initiales et de couplage, dérivées dans un cas du système Arpège-Aladin et dans l'autre du système du CEPMMT.

Il est particulièrement intéressant de constater que les modèles à haute résolution sont bien plus à même de représenter la distribution des précipitations. Ainsi que l'indique la figure 14, le modèle opérationnel Aladin (de résolution spatiale 11 km et reposant sur



## Une contribution essentielle : l'assistance de prévisionnistes expérimentés

Trois prévisionnistes (Julien Billault-Chaumartin, Jérôme Pauthe et Cédric Hertzog) de la Direction interrégionale Nord-Est de Météo-France se sont relayés pour assister les scientifiques au cours de la campagne. Leur expérience du terrain vosgien et leur savoir-faire ont été déterminants dans les prises de décision, particulièrement celles qui ont concerné les missions avion. À cette occasion, ils ont pu également confronter leur expérience et leurs outils (par exemple, la plateforme de visualisation Synergie en arrière-plan) à ceux de leurs collègues germaniques.

l'approximation hydrostatique) sous-estime les faibles précipitations et sur-estime les précipitations moyennes. Ce défaut est très significativement corrigé par les modèles non-hydrostatiques de haute résolution, tant pour Arome que pour Meso-NH.

## Conclusions

Bien qu'il soit un peu tôt pour tirer un bilan définitif des opérations conduites pendant la campagne, il semble acquis que la richesse et la qualité des observations recueillies au cours des mois de juillet et août 2007 permettra à la communauté Cops d'atteindre la majeure partie de ses objectifs. Ainsi que le sou-

lignent volontiers nos collègues allemands, la base de données Cops est un véritable coffre au trésor. Gageons que nous saurons en exploiter les ressources au mieux, tant pour appréhender les mécanismes gouvernant les précipitations convectives que pour en mieux prévoir l'occurrence, l'intensité et la localisation.

## Remerciements

La participation française au projet Cops a bénéficié du soutien financier de l'ANR, du Cnes, du programme Lefe/Idao de l'Insu et de Météo-France. Nous remercions chaleureusement les personnels de l'Eost et de la DIRNE pour leur soutien logistique

ainsi que l'équipe 4M de Météo-France et l'unité mixte CNRS/Cnes/Météo-France Safire pour leur savoir-faire et leur professionnalisme en matière de campagne de terrain. Enfin, Cops n'aurait pas été possible sans l'engagement personnel de nombreux chercheurs, étudiants et techniciens auxquels nous tenons à exprimer nos remerciements et tout particulièrement à O. Caumont et V. Ducrocq (CNRM/Micado), J. Escobar et D. Gazen (LA), D. Bruneau, J. Pelon et S. Bastin (SA), P. Tabary (Météo-France), K. Boniface et P. Collard (GM), L. Estevan, D. Edouart et P.-H. Flamant (LMD), O. Bock et S. Nahmani (IGN), F. Blouzon et A. Abchiche (DT/Insu), D. Legain et O. Garrouste (CNRM/4M) et P. Gégout (IPGS).

## Bibliographie

- Bougeault P., P. Binder, A. Buzzi, R. Dirks, R. A. Houze, J. Kuettner, R. B. Smith, R. Steinacker et H. Volkert, 2001 : The MAP special observing period. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82, 433-462.
- Bouttier F., 2007 : Arome, avenir de la prévision régionale. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 58, 12-20
- Bruneau D., P. Quaglia, C. Flamant et J. Pelon, 2001 : The Airborne Lidar Leandre 2 for Water Vapor Profiling in the Troposphere. Part II: First Results. *Appl. Opt.*, 40, 3462-3475.
- Champollion C., F. Masson, M. N. Bouin, A. Walpersdorf, E. Doerflinger, O. Bock et J. Van Baelen, 2005 : GPS Water vapor tomography: Preliminary results from the Escompte field experiment. *Atmos. Res.*, 74, 253274.
- Champollion C., O. Bock, C. Flamant, F. Masson et T. Weckwerth, 2009 : Mesoscale GPS tomography applied to the 12 June convective initiation event of IHOP 2002. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, sous presse.
- Cuesta J., E. Dimitri, M. Mimouni, P. H. Flamant, C. Loth, F. Gibert, F. Marnas, A. Bouklila, M. Kharef, B. Ouchène, M. Kadi et C. Flamant, 2008 : Multi-platform observations of the seasonal evolution of the Saharan atmospheric boundary layer in Tamanrasset, Algeria, in the framework the African Monsoon Multidisciplinary Analysis field campaign conducted in 2006. *J. Geophys. Res.*, 113, D00C07, DOI:10.1029/2007JD009417.
- Dabas A. et C. Flamant, 2002 : Les instruments de télédétection au sol. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 39, 76-82.
- Doerflinger E., 2001 : Les applications météorologiques du système de positionnement satellitaire GPS. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 34, 21-37.
- Flamant C., F. Guichard, J. Van Baelen, O. Bock, F. Couvreur, D. Parsons, T. Weckwerth, J. Pelon, P. Drobinski, K. Lhomme, M. Guenno et E. Doerflinger, 2003 : La campagne IHOP 2002 : une campagne de mesure de la vapeur d'eau dans la couche limite. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 43, 38-47.
- Lafore J. P., J. Stein, N. Asencio, P. Bougeault, V. Ducrocq, J. Duron, C. Fisher, P. Hérel, P. Mascart, J. P. Pinty, J. L. Redelsperger, E. Richard et J. Vila Guerau, 1998 : The MESO-NH atmospheric simulation system. Part I: Adiabatic formulation and control simulations. *Annales Geophysicae*, 16, 90-109.
- Mauprivez M. et J.-P. Sandra, 2002 : Les profileurs de vent à vocation opérationnelle. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 39, 71-75.
- Rotach M., M. Arpagaus, M. Dorninger, C. Hegg, A. Montani, R. Ranzi, F. Bouttier, A. Buzzi, G. Frustaci, K. Mylne, E. Richard, A. Rossa, C. Schär, M. Staudinger, H. Volkert, V. Wulfmeyer, P. Ambrosetti, F. Ament, C. Appenzeller, H.-S. Bauer, S. Davolio, M. Denhard, L. Fontannaz, J. Frick, F. Fundel, U. Germann, A. Hering, C. Keil, M. Liniger, C. Marsigli, Y. Seity, M. Stoll, A. Walser et M. Zappa, 2008 : MAP D-PHASE: Real-time Demonstration of Weather Forecast Quality in the Alpine Region. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, soumis.
- Van Baelen J., Y. Pointin, F. Tridon, W. Wobrock et G. Peters, 2008 : PREPHIX : Precipitations and microphysical studies with a High resolution X-band radar: Calibration with a bin microphysical model and supporting measurements, Proceedings of the Fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD2008), Helsinki, Finland, 30 juin - 4 juillet 2008.
- Wulfmeyer V., A. Behrendt, H.-S. Bauer, C. Kottmeier, U. Corsmeier, A. Blyth, G. Craig, U. Schumann, M. Hagen, S. Crewell, P. Di Girolamo, C. Flamant, M. Miller, A. Montani, S. Mobbs, E. Richard, M. W. Rotach, M. Arpagaus, H. Russchenberg, P. Schlüssel, M. König, V. Gärtner, R. Steinacker, M. Dorninger, D. D. Turner, T. Weckwerth, A. Hense et C. Simmer, 2008 : The Convective and Orographically-induced Precipitation Study: A Research and Development Project of the World Weather Research Program for improving quantitative precipitation forecasting in low-mountain regions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, DOI 10.1175/2008BAMS2367.1.